

**В.Н.АЛТУХОВ**, канд.техн.наук, Донбасский  
горно-металлургический институт

## **К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНЫХ ДРОБИЛОК**

Стаття присвячена дослідженню закономірностей робочого процесу роторних дробарок, вибору оптимальних структури і параметрів, що забезпечують зниження динамічних навантажень і підвищення технічного рівня дробильних машин. У роботі дане нове рішення актуальної наукової задачі, що полягає в розвитку теорії робочих процесів роторних дробарок, що дозволяє на стадії проектування встановити раціональні структуру і параметри дробарки, прогнозувати енергетичні характеристики процесу дроблення, продуктивність і гранулометричний склад продукту для конкретних умов експлуатації.

The article is devoted to the research of the working process of rotary crushers, choice of the optimum structure and parameters providing lowering of dynamic loads and rise of the technological level of crushing engines. In operation the new solution of the actual scientific task encompassing by development of the theory of working process of rotary crushers allows to install the rational structure and parameters of the crusher at the stage of designing, to forecast the power characteristics of the process of subdivision, productivity and grain composition of the product for the concrete operation conditions.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами.**

Потребность в дробильно-измельчительном оборудовании в металлургической, горнорудной, строительной, химической и других отраслях промышленности, использование вторичного сырья в условиях, когда основные разработчики и производители дробильной техники расположены за пределами Украины, определяют актуальность разработки нового и совершенствование известного дробильного оборудования. Сокращение энергопотребления и повышение эффективности производства является важной научной и практической задачей, что особенно важно в условиях роста добычи полезных ископаемых.

Правильный выбор дробильно-измельчительной машины позволяет оптимизировать процесс дробления, снизить энергозатраты, рационально использовать природные ресурсы, улучшить условия производства и проживания людей. Использование улучшенных конструкций и рациональных режимов работы дробильно-измельчительных машин позволит использовать энергию без расходования ее на лишнее переизмельчение материала, что сократит энергозатраты на 20-50 %.

Эффективность работы и низкие энергозатраты при дроблении материала в центробежно-ударных дробилках ставят их в ряд наиболее перспективных. Преимущества дробления хрупких материалов свободным ударом отмечались исследователями [1,2,3], однако широкое применение машин с принудительным разгоном материала сдерживается отсутствием освоенных технических решений и трудностью обеспечения требуемого гранулометрического

состава готового продукта.

**Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые ссылается автор.**

В публикациях [1,2,3] отмечаются высокие показатели работы центробежно-ударных дробилок (в сравнении с другими типами дробилок - меньшие энергозатраты, высокая производительность, низкий удельный износ контактных поверхностей). При этом, в связи с отсутствием оптимизации параметров работы машин (хаотичность распределения материала в рабочей камере, несогласованность энергии разрушения с физико-механическими свойствами материалов и их структурой, трудностью подачи материала в рабочую камеру в оптимальном количестве) наблюдается значительный разброс по крупности дробленого материала, что существенно ограничивает область применения дробильного оборудования такого типа.

Разработаны различные конструктивные варианты по реализации свободно-го удара в центробежно-ударных дробилках. В рабочей камере транспортировка материала к отбойным плитам может осуществляться однопоточным способом без разделения потока внутри рабочей камеры [2], однопоточным способом с разделением потока материала [4] и двухпоточным способом [5, 6]. Двухпоточное дробление материалов в дробилках с разгонным ротором показало возможность расширения технологических показателей, снижения энергоемкости и металлоемкости. Усовершенствование конструкции роторно-ударной дробилки позволяет улучшить гранулометрические характеристики готового продукта, снизить запыленность помещения, расширить область использования дробилок такого вида, повысить производительность, снизить энергозатраты.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья.**

Неясность некоторых теоретических закономерностей сдерживает широкое применение центробежно-ударных дробилок, не дает возможности выявить оптимальный путь совершенствования машин, сократить затраты на проектирование новой техники, снизить себестоимость готового продукта. Не решена проблема взаимосвязи между размерами рабочей камеры центробежно-ударной дробилки, частотой вращения ротора и силой удара кусков измельчаемого материала об отбойное кольцо; существует значительное расхождение по гранулометрическому составу готового продукта у различных исследователей; имеются трудности по выбору оптимальной конструкции центробежно-ударной дробилки для измельчения различных материалов, отсутствуют четкие рекомендации по реализации при дроблении прямого удара материала об отбойное кольцо.

**Формулирование целей статьи (постановка задачи).**

Целью статьи является исследование особенностей процесса дробления материалов и работы центробежно-ударных дробилок, теоретический анализ связи между размерами центробежно-ударной дробилки, частотой вращения ротора и

силой удара кусков измельчаемого материала об отбойное кольцо; изучение granulometricheskogo состава готового продукта при измельчении доменного шлака на однопоточной роторной дробилке; повышение производительности и снижение энергозатрат при дроблении материала; повышение эффективности дробления за счет реализации принципа приоритетности единичного удара; оптимизации конструктивного выполнения отбойных колец с целью реализации при дроблении прямого удара кусков материала об отбойное кольцо.

**Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов.**

Сложность задачи по расчету энергоемкости процесса измельчения заключается в том, что в настоящее время нет аналитических методов, позволяющих определить количество и размер частей, на которые распадается исходный кусок материала, находящийся под известными силовыми воздействиями. При этом измельчаемый материал обычно представлен в виде сыпучей среды, состоящей из однородных по химическому составу, но весьма разнородных по форме и размеру отдельных кусков. Трудности точного расчета энергозатрат на измельчение в значительной степени обусловлены хаотическим распределением кусков материала между собой и значительным влиянием на процесс разрушения дефектов структуры материала, скрытых и видимых трещин.

Повысить эффективность измельчения материала можно путем обеспечения условий для реализации в центробежно-ударных дробилках прямого удара, при котором вектор скорости куска измельчаемого материала в начале удара направлен по нормали к поверхности отбойного кольца.

Известно [3], что теоретическая скорость вылета кусков измельчаемого материала  $V$  из ротора с радиальными лопастями (без учета сил трения) в 1,41 раза больше окружной скорости  $V_n$  концов лопастей. А с учетом коэффициента трения  $f$  между измельчаемым материалом и лопастями ротора  $V$  больше  $V_n$  в 1,25-1,62 раза.

Окружная скорость  $V_n$ , м/с

$$V_n = \frac{\pi n R}{30},$$

где  $n$  – частота вращения ротора, об/мин;

$R$  – радиус окружности, описываемой концом лопасти, м.

Поскольку отбойные кольца закреплены на корпусе дробилки, а сама дробилка закреплена на фундаменте, то можно считать, что отбойные кольца до и после удара об них измельчаемого материала неподвижны (вибрацию в расчете не учитываем). В процессе работы центробежной дробилки куски измельчаемого материала под действием сил инерции движутся в направлении отбойных колец со скоростью  $V$  и ударяются в отбойные кольца.

Согласно теореме Карно [8], кинетическая энергия, потерянная телами при неупругом ударе, равна кинетической энергии тел, соответствующей их потерянными скоростям.

Рассматривая удар измельчаемого материала об отбойное кольцо, запишем уравнение кинетической энергии:

$$T_0 - T = \frac{mV^2}{2} - \frac{mV_{\kappa}^2}{2},$$

где  $T_0$  – кинетическая энергия материала до удара;

$T$  – кинетическая энергия разрушенных частиц материала после удара;

$m$  – масса материала;

$V_{\kappa}$  – средняя скорость частиц после удара измельчаемого материала об отбойные кольца и его разрушения.

Ориентировочно скорость частиц материала после удара и разрушения на два порядка меньше скорости измельчаемого материала до удара, поэтому можно считать, что кинетическая энергия материала  $T$  после удара составляет 1-2 % от  $T_0$ .

Как известно [8], коэффициент полезного действия машины равен отношению полезной работы к работе, затрачиваемой на приведение машины в движение. В данном случае полезной является работа, израсходованная на разрушение измельчаемого материала. Эта работа равна потере кинетической энергии материала при ударе.

Работа  $A$ , израсходованная на разрушение измельчаемого материала

$$A = (0,98-0,99)T_0$$

Таким образом, работа  $A$  будет зависеть от массы измельчаемых кусков материала, при этом, если кусок материала будет иметь малую массу, то работа  $A$  может быть недостаточна для разрушения материала. Нужно отметить, что попадающие в исходном материале мелкие частицы и без измельчения уже могут иметь крупность, аналогичную крупности готового продукта.

Изменение скоростей исходных кусков измельчаемого материала при ударе связано с большими ударными ускорениями, возникновение которых требует больших ударных сил. Ударная сила быстро возрастает от нуля, в момент начала удара, до максимального значения, затем так же быстро уменьшается, обычно по другому закону, до нуля в конце удара.

При ударе кусков измельчаемого материала об отбойные кольца в месте их соприкосновения возникают деформации, и, следовательно, перемещения частиц материала, обусловленные деформациями [9]. Деформацией отбойных колец, ввиду малых величин, можно пренебречь. А деформация кусков материала приводит к их разрушению. Если считать, что работа, израсходованная на разрушение, будет выполнена ударной силой  $F$  на перемещении  $S$ , то

$$A = FS.$$

Тогда ударная сила  $F$

$$F = A/S.$$

Из данной зависимости следует, что ударная сила  $F$  будет тем больше, чем меньше перемещение  $S$ . При ударе об отбойное кольцо измельчаемый материал вступает в контакт с преградой и получает точку опоры, в то же время на боковых участках куска материала точки опоры нет, и распределенная на куске материала сила  $F$  стремится отколоть частицы материала от исходного куска. Особенность разрушения материала состоит в разрыве связей, осуществляющих сцепление в

материале. Если возникающие напряжения больше допускаемых материалом, то частицы откалываются и происходит разрушение исходного куска материала. Сложность данного расчета состоит в том, что на различных участках измельчаемого материала могут возникать напряжения сжатия, сдвига, изгиба, растяжения, смятия. Какой конкретно вид напряжений приведет к разрушению материала, будет зависеть от многих факторов: геометрической формы кусков исходного материала; конфигурации поверхностей отбойных колец и кусков материала, контактирующих друг с другом в момент удара; вида удара (прямой или косой); прочности связей между частицами в исходном материале; наличия дефектов структуры материала, скрытых и видимых трещин.

Для реализации в центробежных дробилках прямого удара на отбойных кольцах можно выполнить зубчатую футеровку. На рис. 1 показана схема движения куска материала, движущегося с лопасти ротора к отбойному кольцу. Для обеспечения прямого удара рекомендуется брать угол подъема зубьев равным  $47 - 56^\circ$  по направлению вращения ротора [6]. Схема профилирования зубьев футеровки представлена на рис. 2.

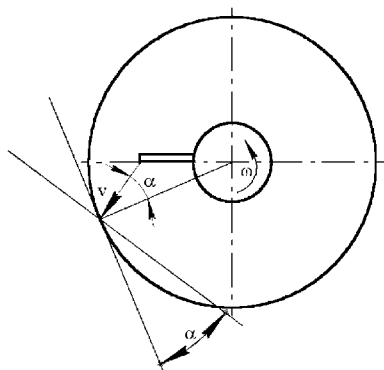


Рисунок 1 – Схема движения куска материала

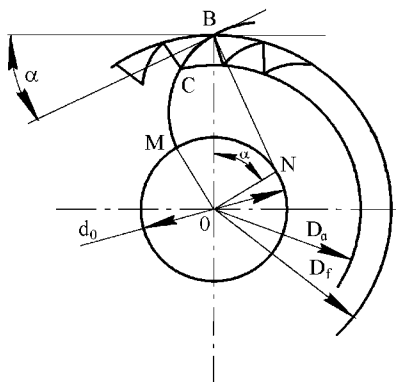


Рисунок 2 – Схема профилирования футеровки.

Поскольку при отдалении эвольвенты от оси ротора угол  $\alpha$  между касательной к эвольвенте в рассматриваемой точке и касательной к окружности, проходящей через эту точку, уменьшается, то, для обеспечения наиболее эффективного процесса дробления путем реализации прямого удара, угол  $\alpha$  между касательной к эвольвенте в точке  $B$  и касательной к окружности диаметром  $D_f$ , проходящей через точку  $B$ , должен быть не менее  $47^\circ$ , а угол  $\alpha$  между касательной к эвольвенте в точке  $C$  и касательной к окружности диаметром  $D_a$ , проходящей через точку  $C$ , должен быть не более  $56^\circ$ . Профиль зубьев футеровки выполняется по эвольвенте, эволютой которой является окружность с диаметром  $d_0$ , определяемым по формуле:

$$D_f \sin 47^\circ \geq d_0 \geq D_a \sin 56^\circ,$$

где  $D_a$  и  $D_f$  – соответственно диаметры окружностей вершин и впадин зубьев футеровки.

Изготовление такой футеровки несложно, поскольку не требуется высокой точности и можно ее получать литьем.

В Научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте проблем дробления и измельчения материалов при Донбасском горно-металлургическом институте (г. Алчевск) при испытаниях опытного образца роторно-ударной дробилки для рудных и нерудных материалов, разработанной под руководством Королева П.П., (в этой дробилке транспортировка материала к отбойным плитам осуществлялась однопоточным способом без разделения потока внутри рабочей камеры), была достигнута производительность 12,3 т/ч при измельчении доменного шлака (крупность исходного материала от 40 до 120 мм, влажность – 8,4 %). Угловая скорость ротора 30,7 с<sup>-1</sup>. Мощность установившегося режима холостого хода – 16,3 кВт. Мощность рабочего хода: 36,841 кВт. Энергозатраты при дроблении составили 2,9-3,4 кВтч/т. Среднеарифметический гранулометрический состав по пяти пробам приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Гранулометрический состав при измельчении доменного шлака

Размеры ячеек сит, мм	20	10	5	2,5	1,6	1,0	0,63	0,4	0,316	0,2	0,16	0,1	0,063	
Остаток на ситах, %	8,6	5,4	22	12,1	8,9	8,0	7,1	6,6	4,5	5,3	3,4	2,4	2,8	3
Суммар- ный %	100	91,4	86	64	51,9	43	35	28	21,4	16,9	11,6	8,2	5,8	3,6

Недостатком такой мельницы является то, что при высокой производительности материал будет перемещаться по диску в несколько слоев, тогда верхние слои материала будут иметь скорость меньше, чем у нижнего слоя, что ухудшает процесс дробления.

Так, анализ проведенных экспериментальных исследований [6] двухпоточной роторно-ударной дробилки показал, что оптимальной производительностью дробилки является 10-12 т/ч. Гранулометрический состав дробленого материала (при оптимальной производительности) при загрузке двумя потоками по сравнению с гранулометрическим составом материала, дробленого при оптимальной однопоточной загрузке, имеет небольшое (до 2-3 %) смещение в сторону более крупных фракций.

Это обусловлено тем, что периодически материал, перемещаемый по нижней ступени, будет попадать в отскочившие от отбойного кольца и па-

дающие вниз разрушенные частицы материала верхней ступени, что понизит эффективность измельчения.

При достижении на двухпоточной дробилке мгновенной производительности в 21,7 т/ч степень дробления исходного материала резко снизилась, было зафиксировано множество кусков крупностью 40 мм и более.

Это обусловлено тем, что при высокой производительности материал будет перемещаться по обеим дискам ротора в несколько слоев, тогда верхние слои материала будут иметь скорость меньше, чем нижние, кроме того, когда перемещаемого материала много, он, при движении к отбойной плите, будет ударяться об куски материала, отскочившие от отбойной плиты, и разрушаться значительно хуже, чем при ударе об отбойную плиту.

Этот недостаток устранен в дробилке [3], которая показана на рис. 3.

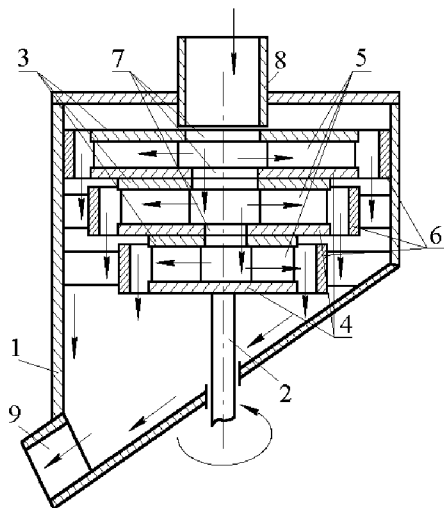


Рисунок 3 – Центробежная дробилка

Указанная дробилка реализует принцип приоритетности единичного удара. Она содержит корпус 1, внутри которого установлен ротор 2. Дробилка содержит несколько ступеней измельчения, каждая из которых выполнена в виде установленных на роторе верхнего 3 и нижнего 4 дисков, между которыми расположены разгонные перегородки 5, и размещенного в корпусе отбойного кольца 6. Каждая ступень измельчения снабжена центральным загрузочным отверстием 7. Диаметры дисков 3 и 4, центральных загрузочных отверстий 7 и отбойных колец 6 уменьшаются по ступеням в направлении сверху вниз. В верхней части корпуса 1 установлена загрузочная воронка 8, а в нижней части корпуса выполнен разгрузочный желоб 9.

В связи с тем, что измельчаемый материал распределяется на потоки внутри ротора, а затем ударяется при вылете из него об соответствующие отбойные кольца (контакт продукта с вновь вылетающим материалом исключен), конечный

продукт имеет более ровный гранулометрический состав. При этом максимально исключается многослойность удара и значительно улучшаются условия разрушения материала, однако сложность конструкции возрастает.

Работая как центробежный вентилятор, роторно-ударная дробилка формирует устойчивый воздушный поток, который играет отрицательную роль как носитель пыли. Поток определяется конструкцией ротора, загрузочного и разгрузочного устройств и рабочей камеры, где происходит дробление. Снизить объем воздушного потока можно путем искусственного создания замкнутых воздушных потоков внутри дробилки.

Современное дробильно-измельчительное оборудование по своим санитарно-гигиеническим показателям полностью не удовлетворяет установленным требованиям и нормам обеспечения нормальных условий работы обслуживающего персонала. Дробление и измельчение материалов связано со значительным шумом, вибрацией, пылеобразованием. Внесение усовершенствований в существующие конструкции машин, а также разработка новых, может позволить одновременно с повышением эффективности процесса измельчения улучшить динамические характеристики машин, уменьшить шум, вибрации, снизить пылеобразование.

**Выводы из данного исследования и перспективы дальнейших работ в данном направлении.**

Теоретическое исследование особенностей процесса дробления материалов в центробежно-ударных дробилках позволило получить зависимость ударной силы  $F$  от размеров ротора центробежно-ударной дробилки и его частоты вращения, получены результаты по гранулометрическому составу готового продукта при измельчении доменного шлака на однопоточной роторной дробилке; исследованы возможности повышения эффективности дробления материалов за счет реализации принципа приоритетности единичного удара при высокой производительности и низких энергозатратах, проведена работа по реализации в центробежно-ударной дробилке прямого удара путем выполнения зубчатой футеровки, причем профиль зубьев выполняется по эвольвенте.

Учитывая пониженные энергозатраты на измельчение в центробежных дробилках и их высокую производительность, целесообразны дальнейшие теоретические и экспериментальные работы в этом направлении.

**Список литературы:** 1. Барон Л.И., Хмельковский И.Е. Разрушение горных пород свободным ударом. – М.: Наука, 1971. – 203 с. 2. Создание опытного образца роторно-ударной ДИМ для рудных и нерудных материалов производительностью до 10 т/ч: Отчет о НИР/НИПКИ «Параметр» при ДГМИ: Руководитель П.П. Королев. – Тема № 4: ГР № 0193 У024515. Инв. № 0294И002393. – Алчевск, 1993. – 17 с. 3. Оскаленко Г.Н. Исследование дробления и измельчения силикатных и других материалов в центробежной роторной мельнице-дробилке: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.05.06. – Днепропетровск, 1965. – 27 с. 4. А.с. № 1808372 СССР. Центробежная дробилка /В.Н. Алтухов. - № 4915172/33. Заявлено 15.04.93. Опубл. 10.10.92. – Бюл. № 14. 5. Королев П.П., Алтухов В.Н., Левченко Э.П. Разработка и исследование роторно-ударной дробилки. / Сб. научных трудов Национальной горной академии Украины. – Днепропетровск, 2002.



– № 13. – С. 36-39. 6. *Королев П.П., Алтухов В.Н. Левченко Э.П.* Исследования по роторно-ударным дробилкам / Сборник научных трудов Донбасского горно-металлургического института. Вып. 16. – Алчевск: ДГМИ, 2002. – С. 180-184. 7. А.с. № 1761265 СССР. Центробежная дробилка / *П.П. Королев, В.Н. Алтухов, А.Н. Онощенко.* -№ 4887543. Заявлено 04.12.90. Опубл. 15.09.92. – Бюл. № 34. 8. *Яблонский А.А., Никифорова В.М.* Курс теоретической механики. – М.: Издательство «Лань», 2002. – 768 с. 9. *Багян Э.Р.* Исследование и разработка способа механического дробления хрупких материалов свободным ударом с использованием центробежного ускорителя. Автореф. дис.канд. техн. наук. Институт геотехнической механики АН УССР. – Днепропетровск, 1986.

*Поступила в редколлегию 15.04.2004.*

УДК 534.1

**А.Б.БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**, НТУ «ХПИ»

## **ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ РАМ ТЕЛЕЖЕК ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИ СЛУЧАЙНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ**

Розглядається задача визначення стохастичних характеристик рам візків вагонів метрополітену при випадковому впливі, викликаному нерівностями шляху, з урахуванням запізнювання. Зовнішній вплив моделюється стаціонарним випадковим процесом. Розрахунок виконано методом кінцевих елементів і методом спектральних представлень, використовувався програмний комплекс ANSYS 6.0. Також розроблена програма на мові Турбо Паскаль для розрахунків запізнювання.

The problem of definition of probability performances of the bogie frames of transit vehicles at random action with delay is considered. The random action is caused by track irregularities. The external load is modelled by the stationary random process. The calculation is executed by the finite element method and the method of spectral representations. The program system ANSYS 6.0 was used. Also the program on Turbo Pascal for delay has been developed.

### **1. Постановка задачи**

Эта работа является продолжением исследований по случайным колебаниям рам тележек вагонов метрополитена с учетом неровности пути [1]. В работе исследуются вынужденные колебания рамы тележки вагона метрополитена ЕЖ-3 при случайном воздействии, вызванном неровностями пути, с учетом запаздывания. Движущийся вагон испытывает действие разнообразных возмущений, главными из которых являются воздействия со стороны пути. Последние зависят от многих, в большинстве случайных, факторов, таких как: непостоянство по длине пути его инерционных, упругих и диссипативных свойств, наличие люфтов, просадок, стыков, неравномерного износа рельсов, ползунов, дисбаланса и других несовершенств колес, воздействие воздушной среды и т.д. Пусть возмущения, действующие на вагон, состоят из ряда некоррелированных между собой составляющих. При этом выражение